МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9 10.23947/1992-5980-2018-18-1-22-30

Особенности несвободного радиального фасонного точения[*]

Д. В. Моисеев[1], А. А. Рыжкин[2]**
[1, 2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Features of constrained radial form turning [***]

D.V. Moiseev[1], A.A. Ryzhkin[2]**
[1, 2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Особенности радиального фасонного точения сравниваются с традиционным резанием прямолезвийным инструментом с постоянной площадью среза. Предполагается определить силовые характеристики в зоне резания с помощью расчетных силовых зависимостей, учитывающих площади мгновенного среза и средние удельные давления, полученные экспериментальным путем. Таким образом, поставленная задача решается в два этапа. Сначала определяются площади среза для различных фасонных профилей, затем проводятся эксперименты, позволяющие получить средние удельные давления на площадках среза. Целью данной работы является решение вопросов первого этапа исследований: определение мгновенных площадей срезов для различных профилей фасонного радиального точения с учетом их зависимости от геометрических и временных параметров радиального врезания.
Материалы и методы. С целью решения поставленных задач разработаны аналитические зависимости. Они позволяют определить мгновенные площади среза при радиальном точении выпуклых, вогнутых и комбинированных радиусных профилей по мере врезания. При этом учитывается время резания, глубина погружения, угол в плане и подача. Площади срезов и их приращения могут быть определены через каждый полный оборот вращения детали. На основании полученных аналитических зависимостей можно судить об особенностях и изменениях величины площадей мгновенного среза при радиальном фасонном точении.
Результаты исследований. По полученным зависимостям рассчитаны мгновенные площади среза при радиальном точении выпуклых и вогнутых радиусных профилей с учетом геометрических параметров и времени врезания. При этом подразумеваются оптимальные условия и режимы фасонного резания.
Обсуждение и заключение. Аналитические зависимости и табличные значения площадей срезов являются базой для определения силовых характеристик и энергетических затрат на основе удельных давлений при фасонном радиальном точении.

Introduction. The radial profile turning features are compared with the conventional turning by a straight tool with a fixed shear area. It is assumed to determine power characteristics in the cutting area by means of the calculated force dependences that take into account instantaneous shear areas and mean specific pressures available from experiments. Thus, the problem is solved in two stages. First, shear areas for various shaped profiles are determined, and then, experiments are performed to obtain mean specific pressures on the cut sites. This work objective is to solve problems of the first investigation stage: determining the instantaneous shear areas for different profiles of the shaped radial turning taking into account their dependence on the geometrics and time parameters of the radial penetration.
Materials and Methods. Analytical dependencies are developed to solve the tasks. They make it possible to determine the instantaneous shear areas under radial turning of convex, concave and combined radius profiles in the course of cutting in. At this, cutting time, length of penetration, approach angle, and feed are taken into account. Shear areas and their increments can be determined through each full turn of the part. The analytical dependences obtained suggest features and variations in the magnitude of the instantaneous shear areas under radial shaping.
Research Results. Instantaneous shear areas under the radial rotation of convex and concave radius profiles taking into account the geometrics and the increment time are calculated from the dependences obtained. This implies optimal conditions and modes of shape cutting.
Discussion and Conclusions. Analytical dependencies and tabulated values of the shear areas are the background for determining power characteristics and energy costs on the basis of the specific pressures for shaped radial turning.

---

[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: denisey2003@mail.ru, ryzhkin.anatolia@yandex.ru
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: несвободное резание, удельное давление при резании, площадь среза, радиальное фасонное точение.

Keywords: constrained cutting, unit tension under cutting, shearing area, shape radial turning.

Образец для цитирования: Моисеев, Д. В. Особенности несвободного радиального фасонного точения / Д. В. Моисеев, А. А. Рыжкин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 1. — С. 22–30.

For citation: D.V. Moiseev, A.A. Ryzhkin. Features of constrained radial form turning. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.1, pp. 22–30.

Введение. Наиболее распространенные фасонные поверхности —радиусные выпуклые, вогнутые и комбинированные. Это, в частности, объясняется тем, что по технологическим причинам любая криволинейная поверхность может быть заменена одной или несколькими сопрягаемыми дугами окружности. Особое место занимают детали типа тел вращения с радиусными симметрично расположенными образующими — например, внутренние и наружные кольца шарикоподшипников, сферических подшипников, детали сферических опор и др. Фасонные поверхности таких деталей обрабатываются стержневыми круглыми, призматическими резцами или фасонными фрезами. Круглые и призматические фасонные резцы являются основным режущим инструментом для обработки фасонных поверхностей в массовом и серийном производстве [1–2]. Они отличаются повышенной жесткостью. При радиальном и тангенциальном точении допускают до 50 переточек с сохранением формы, точности, площадей среза.

На рис. 1 представлена схема обработки вогнутой фасонной поверхности с радиусом обработки *r* и шириной обработки *b*. В исходном положении вершина резца совмещена с точкой *M*, в конечном — с точкой *N*.

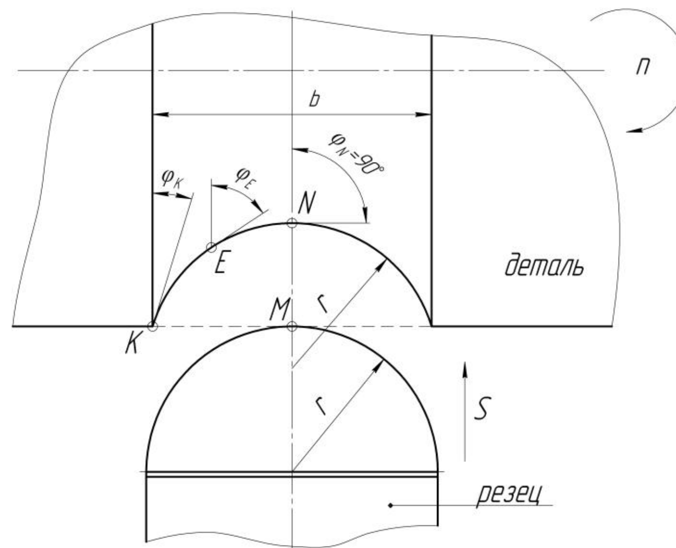


Рис. 1. Схема радиального фасонного точения

Fig. 1. Diagram of radial shape turning

Для обработки фасонной поверхности резец должен переместиться в направлении подачи на величину *M — N*. При этом в процессе погружения резца прогрессивно изменяются основные параметры резания. Сравнивая процесс радиальной фасонной механической обработки с обычным продольным и поперечным резанием прямолезвийным инструментом, следует указать следующие существенные особенности.

1. В процессе радиального врезания длина активной части режущего лезвия прогрессивно увеличивается от нуля в точке *M* до длины дуги полуокружности радиуса *r* при ширине *b* в точке *N*. Соответственно увеличивается и ширина реза — от нуля до *b*.

2. Режущее лезвие фасонного резца можно рассматривать как геометрическое место точек с плавно уменьшающимися углами в плане φ. Так, в точке касания $\varphi_N = \max = 90°$. В точке *E* $\varphi_E < 90°$. Наименьшее значение главный угол в плане имеет в точке *K* (φ_K).

3. В процессе погружения резца минимальный угол в плане φ будет уменьшаться и при величине погружения $MN = r$ принимает нулевое значение.

4. Величина заднего угла α будет уменьшаться от $\alpha_{расч.}$ в точке *M* до $\alpha_i = 0$ при погружении резца на глубину $MN = r$, т. е. процесс резания невозможен.

5. Толщина среза *a* в нормальном сечении не остается постоянной. Максимальная толщина среза *a*, равная величине подачи *S*, имеет место на вершине резца. С уменьшением угла φ по мере смещения точек ре-

жущего лезвия относительно вершины резца толщина среза прогрессивно уменьшается, подчиняясь закону $a \approx S \cdot \sin\varphi$. При погружении резца на глубину r угол в плане $\varphi = 0°$, следовательно, $a = 0$.

6. В процессе радиального резания скорость резания уменьшается с уменьшением диаметра обработки D. Если начальный диаметр обработки $D = 0{,}12$ м, глубина врезания $MN = 0{,}5r$, $r = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$ м, то начальная скорость резания, равная $V_1 = 0{,}5$ м/с, снижается до $V_2 = 0{,}482$ м/с (на 3,8 %), а при $MN = r$ — до $V_2 = 0{,}463$ м/с (более 7 %). С уменьшением первоначального диаметра обработки степень уменьшения скорости резания увеличивается.

7. При обычном продольном и поперечном резании площадь среза остается постоянной и определяется зависимостью $F = t \cdot S = a \cdot b = \text{const}$ (где t — глубина резания). При постоянной толщине среза a условия деформации не изменяются в процессе резания. Это обеспечивает постоянство составляющих усилий резания при неизменной площади среза и угла в плане. При фасонном резании срез имеет серповидную форму с переменной толщиной по длине режущего лезвия. Площадь среза увеличивается по мере врезания за счет увеличения длины активной части режущего лезвия. Определение площади среза требует специальных расчетных формул для конкретных значений величины погружения резца в процессе врезания.

8. Как следствие особенностей, указанных в п. 5 и 7, для радиального резания условия деформации изменяются по длине режущего лезвия с изменением толщины среза, а усилия резания при неизменных режимах увеличиваются по мере радиального врезания за счет увеличения площади среза, ширины и активной части режущего лезвия.

Из перечисленных особенностей следует, что процесс радиального фасонного точения можно рассматривать как наиболее сложный случай несвободного точения.

В работах [3–4] поставлены и частично решены вопросы образования и области границ распределения контактных напряжений для несвободного резания. По приведенным в работах аналитическим зависимостям рассчитывается и строится распределение контактных напряжений. Их можно считать общими для любых плоских сечений в случае постоянства главного угла в плане φ и площади среза F. Однако задача существенно осложняется для криволинейных профилей режущего инструмента ($\varphi \neq \text{const}$) даже при постоянной площади среза из-за того, что условия деформации будут разными для точек и сечений с различными значениями угла в плане. Тем не менее, авторы считают, что при дальнейшем развитии представленной теории задача может быть решена для криволинейных профилей инструментов при неизменной площади среза за счет интегрирования условий деформаций в пределах изменения угла φ.

Зависимости для определения усилий резания $P_z = a \cdot b \cdot k$ [5–6] через площадь среза $a \cdot b$ и удельные силы резания k предполагают постоянство геометрических параметров среза, что имеет место при поперечном точении прямолезвийным режущим инструментом. Рекомендуемые значения удельных усилий резания для различных марок обрабатываемых сталей при толщине среза $a = 0{,}4 \cdot 10^{-3} ... 10^{-3}$ м также не могут быть использованы, т. к. при фасонном точении толщина среза значительно меньше. Исследования [7] показали, что характер зависимости удельной силы резания от толщины среза $k = C \cdot a^{-m}$ изменяется в широком диапазоне — от $m = 0{,}15$ при $a \leq 0{,}1 \cdot 10^{-3}$ м до $m = 764$ при $a > 0{,}1 \cdot 10^{-3}$ м. Данные исследования справедливы при условии постоянства толщины среза по длине режущего лезвия в отличие от рассматриваемого случая, где толщина среза переменна для различных точек режущего лезвия.

Особенности радиального резания не позволяют в полной мере использовать существующие методики и расчетные зависимости для определения усилий, а также скорости резания, тепловых и фрикционных характеристик. Для оценки указанных параметров и особенностей необходимы новые подходы, учитывающие динамические свойства процесса радиального фасонного резания.

В рассматриваемом случае предполагается упрощенная задача определения контактных напряжений экспериментальным путем и вывод аналитических силовых зависимостей через площади среза и соответствующие им средние значения удельных давлений. В этой связи поставленная цель достигается поэтапно. В рассматриваемой работе определяются аналитические зависимости для расчета мгновенных площадей среза. В дальнейшем предполагаются экспериментальные исследования силовых характеристик фасонного резания с целью определения средних контактных давлений и вывода аналитических зависимостей для расчета составляющих усилий резания через площади среза.

Описанные выше особенности радиального фасонного резания имеют место только в процессе врезания на глубину до величины r. При дальнейшем поперечном резании ширина $b = 2r$ стабилизируется, как и большинство параметров резания.

Материалы и методы. Значения мгновенных площадей среза при радиальном точении необходимы для последующих расчетов удельных усилий резания. Очевидно, что для выпуклых и вогнутых радиусных профилей площади среза будут различными. На рис. 2 представлена схема срезов за каждый оборот шпинделя при радиальном точении резцами выпуклого радиусного профиля.

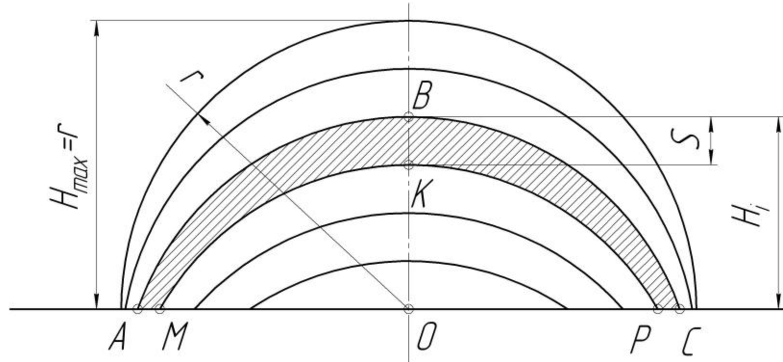


Рис. 2. Схема врезания при радиальном точении выпуклым резцом

Fig. 2. Diagram of increment under radial turning by convex cutter

Каждый срез последовательно отстоит от предыдущего на величину радиальной подачи $S = \text{const}$, а площадь среза прогрессивно увеличивается по мере погружения резца H_i. Рассмотрим любой *i*-й участок мгновенного среза при точении (заштрихован на рис. 2), соответствующий глубине погружения H_i. Для определения мгновенного среза *i*-го участка необходимо из площади *i*-го сегмента *ABC* вычесть площадь (*i* – 1) сегмента *MKP*.

Приравняем порядковый номер участка количеству оборотов шпинделя n'. При $i = 1$, $n' = 1$, глубина погружения $H_i = S \cdot i = S \cdot n_i'$, а соответствующее время погружения $\tau_i = \dfrac{n_i'}{n}$. Здесь n, об/мин, — частота вращения шпинделя.

Площадь сегмента (см. рис. 2) равна:

$$F = \frac{1}{2} r^2 (\varepsilon - \sin\varepsilon), \tag{1}$$

где ε — центральный угол активной части режущего лезвия, который определяется из условия $H_i = r\left(1 - \cos\dfrac{\varepsilon}{2}\right)$. Отсюда:

$$\varepsilon = 2\arccos\left(1 - \frac{H}{r}\right) . \tag{2}$$

Здесь *H* — высота сегмента, равная глубине погружения резца. Для *i*-го и (*i* – 1)-го участка величины погружения H_i и H_{i-1} соответственно равны: $H_i = i \cdot S = S \cdot n_i'$, $H_{i-1} = (i-1) \cdot S = S \cdot n_{i-1}'$.

Тогда площадь среза *i*-го участка:

$$F_i' = \frac{1}{2} r^2 \left[\left(\varepsilon_i - \sin\varepsilon_i\right) - \left(\varepsilon_{i-1} - \sin\varepsilon_{i-1}\right) \right], \tag{3}$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{S \cdot n_i'}{r}\right) \\ \varepsilon_{i-1} &= 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{S \cdot n_{i-1}'}{r}\right). \end{aligned} \tag{4}$$

При постоянной скорости резания мгновенная площадь среза *F*, глубина погружения *H*, время реза τ зависят от подачи: $H_i = S \cdot i = S \cdot n_i'$, $\tau_i = \dfrac{n_i'}{n} = \dfrac{H_i}{n \cdot S_i}$.

Поэтому площадь мгновенного среза может быть представлена как функция количества оборотов n_i', глубины погружения H_i, времени погружения τ_i и минимального угла в плане φ_i: $H_i = f(n_i') = f(H_i) = f(\tau_i) = f(\varphi_i)$.

На рис. 3 представлена схема последовательного радиального врезания резца вогнутого радиусного профиля.

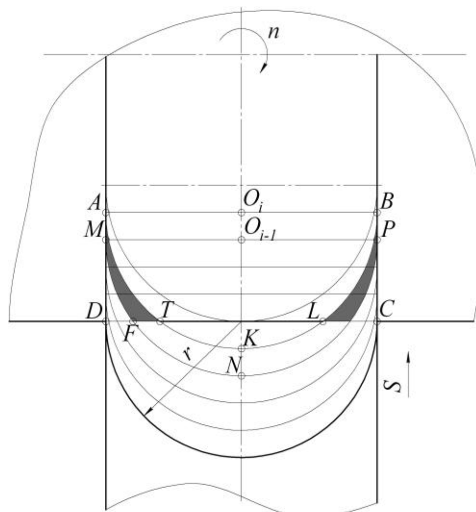


Рис. 3. Схема радиального резания резцом вогнутого радиусного профиля

Fig. 3. Diagram of radial cutting by tool of concave radial profile

Особенностью формирования профиля является равная ширина реза (2*r*) от момента врезания до погружения резца на глубину $H = r$. Площадь мгновенного среза для *i*-го момента представлена заштрихованным участком. Как и ранее, под $i = n_i'$ следует понимать количество полных оборотов детали для данного момента врезания. При этом величина погружения резца $H_i = S \cdot i = S \cdot n_i'$.

От начала резания до рассматриваемого момента (см. рис. 3) точки *D* и *C*, лежащие на полуокружности радиуса *r*, переместились соответственно в точки *A* и *B*. Полуокружность *AKB* соответствует глубине погружения $H_i = S \cdot i$. Предшествующему моменту резания (*i* – 1) соответствует полуокружность *MNP* с глубиной погружения $H_{i-1} = S \cdot (n_i' - 1)$. Тогда площадь мгновенного среза для *i*-го момента можно определить из следующей зависимости:

$$F_i' = F_1 - F_2 - F_3, \tag{5}$$

Здесь F_1 — площадь прямоугольника высотой $H = i \cdot S$ и шириной 2*r*. А F_2 — площадь фигуры *ATKLB*, которая определяется как разница площадей сегмента *AKB* (F_4) с центром O_i и сегмента *TKL*(F_5) с высотой $h = r - S \cdot i$. При этом для любого момента *i* сегмент *AKB* является полукругом с радиусом *r*.

$$F_1 = 2r \cdot S \cdot i. \tag{6}$$

Итак,

$$F_2 = F_4 - F_5 = \frac{\pi r^2}{2} - \frac{1}{2} r^2 \left(\varepsilon_i - \sin \varepsilon_i\right), \text{ где}$$
$$\varepsilon_i = 2\arccos\left(1 - \frac{r - S \cdot i}{r}\right) = 2\arccos\frac{S \cdot i}{r}. \tag{7}$$

Под F_3 следует понимать удвоенную площадь фигуры *MDF*:

$$F_3 = F_6 - F_7,$$

где $F_6 = 2r \cdot S\left(i-1\right)$ — площадь прямоугольника *MDCP*; $F_7 = F_8 - F_9$ — площадь фигуры *MFLP*; F_8 — площадь полукруга с центром O_{i-1}; F_9 — площадь сегмента с высотой $h = r - S(i-1)$.

Тогда:

$$F_3 = F_6 - F_8 + F_9 = 2r \cdot S(i-1) - \frac{\pi r^2}{2} + \frac{1}{2} r^2 \left(\varepsilon_{i-1} - \sin \varepsilon_{i-1}\right), \text{ где}$$
$$\varepsilon_{i-1} = 2\arccos\left(1 - \frac{r - S \cdot (i-1)}{r}\right) = 2\arccos\frac{S \cdot \left(i-1\right)}{r}. \tag{8}$$

Подставим значения (6), (7), (8) в выражение (5). После преобразования получим:

$$F_i' = 2r \cdot S + \frac{r^2}{2}\left(\varepsilon_i - \sin\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1} + \sin\varepsilon_{i-1}\right), \qquad (9)$$

где $\varepsilon_i = 2\arccos\frac{S \cdot i}{r}$, $\varepsilon_{i-1} = 2\arccos\frac{S \cdot (i-1)}{r}$.

Количество точек i, для которых можно определить мгновенные площади среза при точении вогнутым профилем: $i_{\max} = \frac{r}{S}$.

На рис. 4 представлена схема радиального точения резцом с комбинированным выпукло-вогнутым профилем.

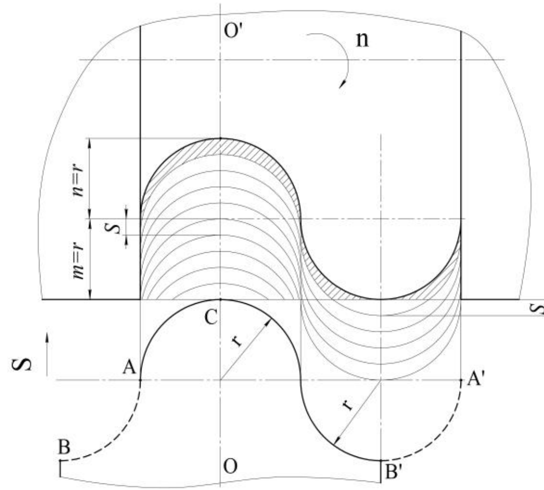


Рис. 4. Схема радиального точения выпукло-вогнутым профилем

Fig. 4. Diagram of radial turning by cutter of convex-concave profile

Примером выпукло-вогнутого радиусного профиля могут служить сопрягаемые формы зубьев и впадин колеса эллиптического зацепления в торцевом сечении, которое преобразуется за счет наклона зубьев в форму эллипса в нормальном сечении [8–9]. Обычно в этом случае резцы имеют ось симметрии OO'. Для простоты аналитического расчета мгновенных площадей среза целесообразно условно перенести дугу AB в положение $A'B'$. При радиальном точении комбинированным выпукло-вогнутым профилем резца мгновенная площадь среза может быть суммой срезов на выпуклом и вогнутом участках. Как следует из рис. 4, процесс резания для выпукло-вогнутого профиля делится на две последовательные фазы (*m* и *n*).

m) Врезание выпуклого профиля на глубину *r* с увеличивающейся площадью среза от 0 до $F'_{\max}$, где из уравнения (9):

$$F'_{\max} = \frac{1}{2}r^2\left[\pi - \left(\varepsilon_{i\max-1} - \sin\varepsilon_{i\max-1}\right)\right]$$
$$при\ \varepsilon_{\max} = \pi \qquad (10)$$
$$\varepsilon_{i\max-1} = 2\arccos\left(1 - \frac{r-S}{r}\right).$$

n) Совместное формирование выпуклого профиля с постоянной площадью среза $F'_{\max}$ и вогнутого профиля с переменной площадью F_i'' при врезании на глубину *r*. В этом случае мгновенная площадь F'_{io} суммируется и равна:

$$F'_{io} = F'_{\max} + F_i''.$$

После преобразования:

$$F'_{io} = \frac{1}{2}r^2\left[\pi - \left(\varepsilon_{i\max-1} - \sin\varepsilon_{i\max-1}\right) + \left(\varepsilon_i - \sin\varepsilon_i\right) - \left(\varepsilon_{i-1} - \sin\varepsilon_{i-1}\right)\right]. \qquad (11)$$

Таким образом, при первоначальном врезании комбинированного резца на глубину *r* мгновенная площадь среза определяется по уравнению (9), а при последующем врезании на глубину *r* (при общей глубине 2*r*) — по уравнению (11).

Результаты исследования. Полученные зависимости при радиальном точении позволяют определить мгновенные площади среза для выпуклых, вогнутых и комбинированных радиусных профилей инструмента.

Представленные уравнения могут быть трансформированы, например, от радиусных до эллиптических профилей посредством введения корригирующих коэффициентов.

Получены аналитические зависимости для конкретных геометрических параметров и режимов резания, рекомендованных нормативами для фасонного точения быстрорежущим и твердосплавным инструментом [10]: $r = 4,5 \cdot 10^{-3}$ м; $S_1 = 0,035 \cdot 10^{-3}$ м/об; $S_2 = 0,07 \cdot 10^{-3}$ м/об; $S_3 = 0,105 \cdot 10^{-3}$ м/об при $V_1 = 0,27$ м/с; $V_2 = 0,41$ м/с; $V_3 = 0,48$ м/с; $V_4 = 0,75$ м/с; $V_5 = 1,17$ м/с; $V_6 = 1,67$ м/с. В соответствии с ними просчитаны и получены значения площадей срезов в зависимости от параметров резания при точении выпуклых и вогнутых профилей. В табл. в качестве примера в сокращенном виде приведены результаты расчетов для выпуклых радиусных резцов.

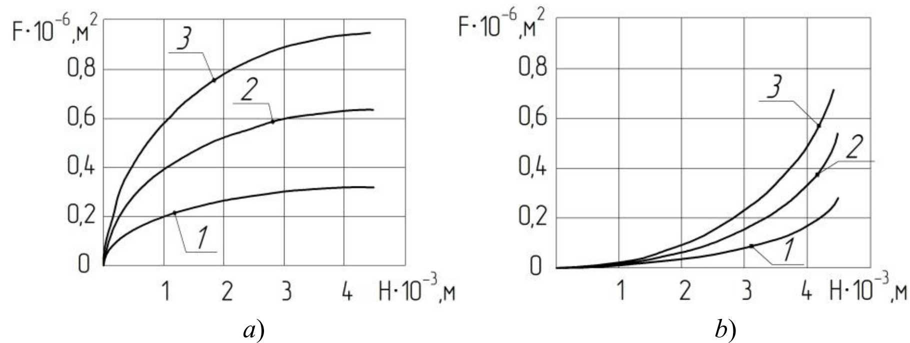
Таблица 1
Table 1

Площади среза при радиальном точении выпуклым радиусным резцом ($r = 4,5 \cdot 10^{-3}$ м)

Shear areas under radial turning by convex radius cutter ($r = 4,5 \cdot 10^{-3}$ m)

n'	τ, с						$S = 0,035 \times 10^{-3}$ м/об.			$S = 0,07 \times 10^{-3}$ м/об.			$S = 0,105 \times 10^{-3}$ м/об.		
	V=0,27, м/с	*V=0,41*, м/с	*V=0,48*, м/с	*V=0,75*, м/с	*V=1,17*, м/с	*V=1,67*, м/с	$F10^{-6}$, м^2	φ°	$H10^{-3}$, м	$F10^{-6}$, м^2	φ°	$H10^{-3}$, м	$F10^{-6}$, м^2	φ°	$H10^{-3}$, м
0	0	0	0	0	0	0	0	90,00	0	0	90,00	0	0	90,00	0
1	1,09	0,71	0,61	0,38	0,23	0,16	0,026161	82,85	0,035	0,0739079	79,88	0,07	0,1356182	77,6	0,105
8	8,73	5,65	4,85	3,06	1,87	1,31	0,1059915	69,68	0,28	0,2952479	61,11	0,56	0,5339316	54,42	0,84
16	17,5	11,3	9,7	6,11	3,74	2,62	0,1499331	61,11	0,56	0,4102457	48,69	1,12	0,7273763	38,8	1,68
24	26,2	16,9	14,5	9,17	5,6	3,92	0,1815375	54,42	0,84	0,4869564	38,8	1,68	0,8430863	26,1	2,52
32	34,9	22,6	19,4	12,2	7,47	5,23	0,2065505	48,69	1,12	0,5418999	30,15	2,24	0,9111908	14,67	3,36
40	43,6	28,2	24,2	15,3	9,34	6,54	0,2271605	43,54	1,4	0,5812832	22,2	2,8	0,9420746	3,82	4,2
48	52,4	33,9	29,1	18,3	11,2	7,85	0,2444837	38,81	1,68	0,6081375	14,67	3,36			
56	61,1	39,5	33,9	21,4	13,1	9,16	0,2591801	34,36	1,96	0,6240822	7,41	3,92			
64	69,8	45,2	38,8	24,5	14,9	10,5	0,2716763	30,15	2,24	0,6299466	0,25	4,48			
72	78,5	50,8	43,6	27,5	16,8	11,8	0,2822647	26,1	2,52						
80	87,3	56,5	48,5	30,6	18,7	13,1	0,2911535	22,2	2,8						
88	96	62,1	53,3	33,6	20,5	14,4	0,2984946	18,39	3,08						
96	105	67,8	58,2	36,7	22,4	15,7	0,3044001	14,67	3,36						
104	113	73,4	63	39,7	24,3	17	0,3089522	11,02	3,64						
112	122	79,1	67,9	42,8	26,1	18,3	0,3122101	7,41	3,92						
120	131	84,7	72,7	45,9	28	19,6	0,3142142	3,82	4,2						
128	140	90,4	77,6	48,9	29,9	20,9	0,3149883	0,25	4,48						

На рис. 5 представлены графики изменения площадей среза для выпуклых (*а*) и вогнутых (*б*) радиусных профилей по мере радиального врезания.



a) *b*)

Рис. 5. Зависимость площади среза от величины врезания для выпуклых (*a*) и вогнутых (*b*) радиусных резцов при $n = 99$ об/мин ($V = 0,48$ м/с). Кривые: 1 — $S_1 = 0,035 \cdot 10^{-3}$ м/об; 2 — $S_2 = 0,07 \cdot 10^{-3}$ м/об; 3 — $S_3 = 0,105 \cdot 10^{-3}$ м/об

Fig. 5. Dependence of shear area on increment value for convex (a) and concave (b) radial cutters under $n = 99$ *rpm (*$V = 0,48$ *met/sec.). Curves: 1 —* $S_1 = 0,035 \cdot 10^{-3}$ *m/rev; 2 —* $S_2 = 0,07 \cdot 10^{-3}$ *m/rev; 3 —* $S_3 = 0,105 \cdot 10^{-3}$ *m/rev*

Как следует из проведенных исследований, площади среза, в отличие от традиционного резания, не остаются постоянными, а увеличиваются с увеличением подачи и по мере радиального врезания. При этом изменяется толщина среза для точек режущего лезвия и, соответственно, меняются условия деформации. В этой связи традиционные методы для вывода аналитических зависимостей усилий резания в данном случае неприменимы из-за прогрессивно изменяющейся величины площади среза.

Обсуждение и заключения. Методика определения аналитических силовых зависимостей должна быть основана на расчете средних значений удельных усилий на площадках контакта, полученных расчетным или экспериментальным путем.

В данной работе учтены особенности радиального фасонного точения и связанные с этим сложности аналитических расчетов контактных напряжений на площадках среза за счет определения полей пластического деформационного состояния. В этой связи предлагается определять средние удельные усилия резания за счет планируемых экспериментальных исследований.

Таким образом, полученные аналитические уравнения и табличные значения площадей срезов служат базой для определения силовых характеристик и энергетических затрат на основе удельных давлений и площадей среза при фасонном радиальном точении.

Библиографический список

1. Рыжкин, А. А. Фасонные резцы / А. А. Рыжкин, В. С. Каганов. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2001. — 135 с.

2. Грановский, Г. И. Фасонные резцы / Г. И. Грановский, К. П. Панченко. — Москва : Машиностроение, 1975. — 309 с.

3. Петрушин, С. И. Теория несвободного резания материалов. Геометрия несвободного резания / С. И. Петрушин, А. В. Проскоков // Вестник машиностроения, 2009. — № 11. — С. 56–63.

4. Петрушин, С. И. Теория несвободного резания материалов. Расчет напряженно-деформированного состояния в зоне резания / С. И. Петрушин, А. В. Проскоков // Вестник машиностроения. — 2010. — № 2. — С. 40–44.

5. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1987. — 846 с.

6. Ящерицын, П. И. Теория резания / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. — Минск : Новое знание, 2006. — 512 с.

7. Spur, G. Handbuch der Fertigungstechnik/ G. Spur, T. Stöferle. — München : Carl Hanser Verlag, 1979. — 1276 s.

8. Зубчатая передача : патент 2057267 Рос. Федерация : F16H1/24 / Г. П. Гребенюк. — Заявл. 07.04.93 ; опубл. 27.03.96, Бюл. № 9. — 5 с.

9. Определение координат боковых сторон зубьев колес с эллиптическим профилем / А. А. Рыжкин [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. —2009. — Т. 9, № 2 (41). — С. 284–295.

10. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / Ю. А. Абрамов [и др.] ; под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. — Москва : Машиностроение, 1985. — 496 с.

References

1. Ryzhkin, A.A., Kaganov, V.S. Fasonnye reztsy. [Form cutters.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2001, 135 p. (in Russian).

2. Granovskiy, G.I., Panchenko, K.P. Fasonnye reztsy. [Form cutters.] Moscow: Mashinostroenie, 1975, 309 p. (in Russian).

3. Petrushin, S.I., Proskokov, A.V. Teoriya nesvobodnogo rezaniya materialov. Geometriya nesvobodnogo rezaniya. [Theory and geometry of constrained cutting.] Vestnik Mashinostroeniya, 2009, no. 11, pp. 56–63 (in Russian).

4. Petrushin, S.I., Proskokov, A.V. Teoriya nesvobodnogo rezaniya materialov. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v zone rezaniya. [Theory of constrained cutting: Calculating the stress-strain state in the cutting zone.] Vestnik Mashinostroeniya, 2010, no. 2, pp. 40–44 (in Russian).

5. Ordinartsev, I.A., et al. Spravochnik instrumental'shchika. [Toolmaker's reference guide.] Moscow: Mashinostroenie, 1987, 846 p. (in Russian).

6. Yashcheritsyn, P.I., Feldstein, E.E., Kornievich, M.A. Teoriya rezaniya. [Cutting theory.] Minsk: Novoe znanie, 2006, 512 p. (in Russian).

7. Spur, G., Stöferle, T. Handbuch der Fertigungstechnik. München: Carl Hanser Verlag, 1979, 1276 s.

8. Grebenyuk, G.P. Zubchataya peredacha: patent 2057267 Ros. Federatsiya: F16H1/24. [Gear transmission.] Patent RF no. 2057267, 1996 (in Russian).

9. Ryzhkin, A.A., et al. Opredelenie koordinat bokovykh storon zub'yev koles s ellipticheskim profilem. [Determination of coordinates of cog's sides of the gears with elliptic profile.] Vestnik of DSTU, 2009, vol. 9, no. 2 (41, pp. 284–295 (in Russian).

10. Abramov, Y.A., et al. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. T. 2. [Reference guide of tooling-mechanical engineer. Vol. 2.] Kosilova, A.G., Meshcheryakov, R.K., eds. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 496 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 03.10.2017
Сдана в редакцию 09.10.2017
Запланирована в номер 15.01.2018

Received 03.10.2017
Submitted 09.10.2017
Scheduled in the issue 15.01.2018

Об авторах:

Моисеев Денис Витальевич,
старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7186-7758
denisey2003@mail.ru

Рыжкин Анатолий Андреевич,
и. о. заведующего кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2483-8567
ryzhkin.anatolia@yandex.ru

Authors:

Moiseev, Denis V.,
senior lecturer of the Metal-Cutting Machines and Tools Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7186-7758
denisey2003@mail.ru

Ryzhkin, Anatoly A.,
acting head of the Metal-Cutting Machines and Tools Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2483-8567
ryzhkin.anatolia@yandex.ru